Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 1, Mar.-Apr. 2024, p. 1-21

The Effect of Climate Change and Planting Date on the Green Water Footprint of Fall Wheat 2021-2100 (Case Study: Qazvin Plain)

F. Borzoo[1], H. Ramezani Etedali[2*], A. Kaviani[3]

1, 2 and 3- M.Sc Student, Professor and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

Received: 23-10-2023
Revised: 26-01-2024
Accepted: 02-04-2024
Available Online: 02-04-2024

How to cite this article:
Borzoo, F., Ramezani Etedali, H., & Kaviani, A. (2024). The effect of climate change and planting date on the green water footprint of fall wheat 2021-2100 (case study: Qazvin Plain). *Journal of Water and Soil, 38*(1), 1-21. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84991.1349

Introduction

Climate change is one of the most important issues in the world in the 21st century which affects various sectors of agriculture, forestry, water and financial markets, and has serious economic consequences (Reidsma et al., 2009). In recent years, the management of agricultural water consumption has always been considered as one of the important issues in water resources management. Koochaki and colleagues (Koochaki and Kamali, 2006) by evaluating the climatic indicators of Iran's agriculture showed that during the next 20 years, the average monthly temperature will increase in almost all regions of the country, and the increase in evaporation and transpiration is one of the most important consequences of this warming. Simulated climate parameters can be obtained through different general GCM atmospheric models. Due to the low spatial resolution of these models, its output should be downscaled using dynamic or statistical methods.

Materials and Methods

The LARS-WG model predicts meteorological variables for a period of time in the future by using a series of basic and fine-scale meteorological data, output of one of the GCM models. Research has shown that the LARS-WG model has the necessary accuracy for this task. Calculating the amount of evapotranspiration and yield of very complex plants are time-consuming and dependent on spending a lot of money and limited to the tests performed, the shortness of the test time and also the limitation in the number of scenarios that are checked by the test. Therefore, plant models are considered and evaluated by researchers. The AquaCrop model has demonstrated commendable accuracy in various regions of Iran and globally for forecasting plant growth, water consumption efficiency, and evapotranspiration requirements. These predictions hold significant potential for optimizing irrigation strategies across different agricultural settings. AquaCrop is one of the applied agricultural models that was obtained from the modification and revision of FAO publication No. 33 by prominent experts from all over the world. In this study, the values of green water footprint of winter wheat plant (Pishgam) were estimated in climatic conditions obtained from LARS-WG model and DKRZ database under scenarios 4.5 and 8.5 and at different planting dates (15 October, 1 November, 15 November, 30 November and 15 December), in the next 4 periods (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 and 2081-2100) and by Aquacrop model.

Results and Discussion

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84991.1349

The results showed that if planting date is on October 15, in the climatic conditions obtained from the LARS-WG model and under scenarios 4.5 and 8.5, in all future periods, the footprint of green water will increase compared to its value in the base period, and if planting is the rest of the dates, in each of the next 4 periods, the average green water footprint will decrease compared to its value in the base period. The results obtained for the DKRZ database show that the green water footprint attained for the dates of cultivation and periods investigated in scenarios 4.5 and 8.5 does not have a particular trend. On the planting dates of October 15 and November 1 for the periods of 2061-2080 and 2081-2100, the green water footprint will decrease and on the other three dates (15 November, 30 November, and 1 November) for these periods, there will be an increasing trend. On 15 December, for the DKRZ database, in both scenarios defined for all periods, an increase in green water footprint compared to the base period is reported. However, in the period of 2081-2100 in scenario 8.5, a decrease compared to the base period will be observed. The highest amount of green water footprint in all these periods and models for the period 2041-2060 under the climatic conditions of the DKRZ database in scenario 4.5, if the planting date is 15 October, it is estimated that the amount of water consumed is equal to 4272 cubic meters per ton with a standard deviation of 5018 cubic meters per ton is predicted. The lowest footprint of green water for the period 2081-2100 under the climatic conditions obtained from the LARS-WG model in scenario 8.5, if the planting date is on 15 December, is reported to be 232 tons per hectare with a standard deviation of 52.3 tons per hectare.

Keywords: Green water footprint, LARS-WG, DKRZ, Simulation

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳، ص.۲۱-۱

اثر تغییر اقلیم و تاریخ کشت بر ردپای آب سبز در گندم پاییزه ۲۱۰۰-۲۰۲۱ (مطالعه موردی: دشت قزوین)

فاطمه برزو[۱]- هادی رمضانی اعتدالی[۲]*- عباس کاویانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

چکیده

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم برای آینده کشاورزی است که نتیجه بی‌توجهی به آن، به خطر افتادن امنیت غذایی جوامع است. از این رو پیش‌بینی تغییرات اقلیمی ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه مقادیر ردپای آب سبز گیاه گندم پاییزه (رقم پیشگام) در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG و پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ و در تاریخ‌های کشت متفاوت (۱۵ مهر، ۱ آبان، ۱۵ آبان، ۳۰ آبان و ۱۵ آذر)، در ۴ دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) با استفاده از مدل Aquacrop برآورد گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد؛ اگر تاریخ کشت ۱۵ مهر ماه انجام شود، در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG و تحت سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵، در تمام دوره‌های آتی ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش می‌یابد و اگر کشت در بقیه تاریخ‌ها صورت گیرد، در هر ۴ دوره آتی میانگین ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه کاهش خواهد داشت. نتایج به‌دست آمده برای پایگاه اطلاعاتی DKRZ نشان می‌دهد، ردپای آب سبز بدست آمده برای تاریخ‌های کشت و دوره‌های مورد بررسی در سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵، از روند خاصی برخوردار نیست. در تاریخ‌های کشت ۱۵ مهر و ۱ آبان برای دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱، ردپای آب سبز کاهش خواهد داشت و در سه تاریخ دیگر (۱۵ آبان، ۳۰ آبان و ۱ آذر) برای این دوره‌ها، روند افزایشی و کاهشی خواهد داشت و در تاریخ ۱۵ آذر برای پایگاه اطلاعاتی DKRZ در هر دو سناریو تعریف شده برای همه دوره‌ها، افزایش رد پای آب سبز نسبت به دوره پایه گزارش می‌شود؛ به‌جز دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در سناریو ۸/۵ که شاهد کاهش آن نسبت به دوره پایه خواهیم بود. بیشترین مقدار ردپای آب سبز در تمام این دوره‌ها و مدل‌ها برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ تحت شرایط اقلیمی پایگاه اطلاعاتی DKRZ در سناریو ۴/۵ در صورتی‌که تاریخ کشت ۱۵ مهرماه انجام شود، تخمین زده می‌شود که مقدار مصرف آب در آن برابر ۴۲۷۲ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۵۰۱۸ متر مکعب بر تن پیش‌بینی می‌شود. کم‌ترین ردپای آب سبز نیز برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ تحت شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG در سناریو ۸/۵ در صورتی که تاریخ کشت ۱۵ آذر ماه انجام شود، گزارش می‌شود که مقدار آن برابر ۲۳۲ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۵۲/۳ متر مکعب بر تن است.

واژه‌های کلیدی: ردپای آب سبز، شبیه‌سازی، DKRZ، LARS_WG

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استاد و دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.84991.1349

مقدمه

مسئله تغییر اقلیم در حال حاضر به یکی از چالش‌های اساسی دنیا در کشاورزی تبدیل شده است. از این رو محققان زیادی به بررسی پدیده تغییر اقلیم و پیش‌بینی آن دردوره‌های آتی پرداختند. محققان به منظور شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی، اقدام به طراحی مدل‌های ریزمقیاس کرده‌اند. از جمله مدل‌هایی که در روش‌های آماری استفاده می‌شوند SDSM، LARS-WG، GEM، CLIMGEN، USCLIMATE WGEN هستند. این مدل‌ها سری‌های زمانی روزانه متغیرهای هواشناسی همانند بارش، دما و تشعشع خورشیدی را تولید می‌نمایند (Racsko *et al.*, 1991). LARS-WG یکی از مدل‌های ریز مقیاس‌ساز است که در عین پیچیدگی کمتر فرآیند شبیه‌سازی و داده‌های ورودی و خروجی، توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییر اقلیم دارد (Semonov & Stratonovith, 2010). سایر پارامترهای آب و هوایی همانند سرعت باد و نقطه شبنم را می‌توان توسط این مدل شبیه‌سازی نمود (Parlange *et al.*, 2000). در مطالعه‌ای به مقایسه دو مدل LARS-WG و SDSM جهت شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا واقع در جزیره جنوبی نیوزلند پرداخته شد؛ نتایج حاصل نشان داد که هر دو مدل توانایی‌هایی مشابه و خوبی در شبیه‌سازی بارش‌های شدید دارند و قابل استفاده برای پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌باشند (Hashmi *et al.*, 2011). در مطالعه‌ای دیگر به مقایسه سه مدل LARS-WG، Weatherman و Climgen در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در سه اقلیم متخلف گرگان، گنبد و مشهد پرداختند، نتایج؛ حاکی از کارایی بهتر LARS-WG در شبیه‌سازی پارامتر حداقل دما در منطقه های گرگان و مشهد است و به‌طور کلی هر سه مدل، پارامتر دما را بهتر از سایر پارامترها اقلیمی پیش‌بینی می‌کند (Hajjarpour *et al.*, 2014). با استفاده از آمار و اطلاعات ۲۰ ایستگاه در نقاط مختلف دنیا و استفاده از اطلاعات آب و هوایی مشاهده شده بین ۳۰ تا ۵۶ سال، توانایی بالای مدل تولیدکننده جوی LARS-WG را برای شبیه‌سازی رویدادهای جوی مورد بررسی و تأیید قرار داد. به‌طور کلی، نتایج اغلب مطالعات نشان‌دهنده برتری مدل شبکه عصبی مصنوعی و مدل LARS-WG در پیش‌بینی تغییرات اقلیم است (Semenov *et al.*, 2008). عجمی‌زاده و ملایی نیا (Ajamzadeh & Mollaeinia, 2016) به مقایسه عملکرد روش‌های ریزمقیاس گردانی SDSM و LARS-WG در ایستگاه سد تنگاب در استان فارس پرداختند نتایج حاصل حاکی از عدم برتری مطلق مدل‌ها بر یکدیگر است. با توجه به تحقیقات انجام شده در سراسر دنیا پدیده تغییر اقلیم در بعضی مناطق با شدت و در مناطق دیگر با سرعت کمتری در حال وقوع است بنابراین تغییر در الگو و میزان مصرف آب آبیاری در کشاورزی ضروری به‌نظر می‌رسد. مفهوم ردپای آب اولین بار در سال ۲۰۰۳ معرفی شد (Hoekstra & Chapagain, 2007). برای اندازه‌گیری بهره‌وری آب زراعی و برای ارزیابی آب مصرفی محصول و عملکرد آن محاسبات ردپای آب روشی مناسب می‌باشد (Morillo *et al.*, 2015). محققان در سال‌های اخیر به بررسی ردپای آب در محصولات مختلف کشاورزی نظیر گندم (Aligholinia *et al.*, 2019)، برنج (Nana *et al.*, 2014)، ذرت (Ene *et al.*, 2013) و غیره پرداختند. با این حال در حال حاضر با توجه به پدیده تغییر اقلیم مطالعات زیادی در بررسی ردپای آب و تأثیر تغییر اقلیم بر آن صورت نگرفته است. حجمی آبی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید کالا استفاده می‌شود تحت عنوان شاخص ردپای آب محاسبه می‌شود. ردپای آب شامل ردپای آب آبی، سبز و خاکستری می‌باشد. البته ردپای آب سفید نیز توسط آبابایی و رمضانی اعتدالی (Ababaei & Ramezani Etedali, 2014) معرفی شد. ردپای آب آبی، به حجم آبی که در تولید محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد (نیاز خالص) اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی (مؤثر) مرتبط است. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای رقیق‌سازی کودها و سمومی که در فرآیند تولید محصول استفاده شده‌اند مورد نیاز است. مفهوم ردپای آب سفید مفهوم جدیدی است که میزان تلفات آب آبیاری در تولید محصولات را مشخص می‌سازد (Ababaei & Ramezani Etedali, 2014). یکی از بررسی‌ها مطالعه‌ای است که در آن به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ردپای آب و عملکرد ذرت پرداخت است. در این مطالعه از مدل CropSyst تحت سه سناریو بدون آبیاری، آبیاری دستی در زمان‌های ثابت و آبیاری اتوماتیک براساس نیاز آبی در بازه ۱۹۷۵ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. سپس به بررسی اثر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۵۴-۲۰۴۵ با استفاده از ۴ مدل PCM، CCSM3، HadCM3 و ECHAM5 تحت سناریو A2 پرداختند. نتایج، بیانگر افزایش دما و کاهش بارندگی در دوره‌های آتی می‌باشد که موجب کاهش عملکرد و افزایش ردپای آب به‌ویژه آب آبی به‌دلیل افزایش تبخیر تعرق و نیاز آبی خواهد شد (Bocchiola *et al.*, 2013). ردپای آب تولید ملی گندم قبلاً برای کل جهان در مطالعات مقیاس جهانی برآورد شده است. در این مطالعه برآوردهای قبلی مؤلفه‌های مختلف ردپای آب (سبز، آبی، خاکستری و سفید) تولید ملی گندم در ایران با برآوردهای مقیاس ملی مقایسه شد. یک جزء جدید ردپای آب سفید برای محاسبه تلفات آبیاری پیشنهاد شد. اجزای مختلف ردپای آب گندم برای ۲۳۶ دشت در پانزده استان عمده تولید کننده گندم برآورد شد. میانگین کل ردپای آب بین تمام استان‌های منتخب حدود ۳۱۸۸ متر مکعب در تن با سهم قابل مقایسه آب آبی و سبز است، در حالی‌که میانگین کل ردپای آب برای مناطق دیم حدود ۳۰۷۱ متر مکعب در تن با سهم ۹ برابر ردپای آب سبز است (Ababaei & Ramezani Etedali, 2014). در مطالعه‌ای در شمال چین ردپای آب سبز، ردپای آب آبی و ردپای کل آب از پنج محصول (یعنی گندم،

ذرت، پنبه، بادام زمینی و لوبیا) محاسبه شد و توزیع آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که محصولات مختلف در زیرمناطق مختلف دارای ردپای سبز، آبی و کل متفاوت هستند (Wang *et al.*, 2021). در مطالعه‌ای به دنبال تعیین شواهدی از تغییرات اقلیمی در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۰ و تأثیر ناشی از آن بر رد پای آب آبی در تولید گندم زمستانه در زیمبابوه انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد اثرات تجمعی تغییرات اقلیمی بر نیاز آبی محصولات و عملکرد گندم، ردپای آب آبی را تا ۴ درصد افزایش می‌دهد. نتایج دیگر این مطالعه نشان داد که تغییرات اقلیمی و عوامل مدیریت کشاورزی ممکن است به یک اندازه باعث افزایش ردپای آب شوند (Govere *et al.*, 2020). در تحقیقی مفهوم ردپای آب در مقیاس منطقه‌ای برای اولین بار در کشور مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی چارچوب محاسباتی آبابایی و رمضانی اعتدالی (Ababaei & Ramezani Etedali, 2017) استفاده شد تا ردپای آب خاکستری و سفید را بهتر توضیح دهد. میانگین وزنی هر جزء ردپای آب (سبز، آبی، خاکستری و سفید) و ردپای کل آب ملی در تولید غلات اصلی (گندم، جو و ذرت) محاسبه شد. تولید گندم، جو و ذرت ۳۶۷۷۷، ۷۹۷۵ و ۳۷۴۴ میلیون متر مکعب (MCM) در سال برای دوره ۲۰۱۲-۲۰۰۶ برآورد شد. نسبت کل ردپای آب سبز سه محصول به ردپای آب ملی کل (یعنی همه محصولات) ۴۳٪ و نسبت ردپای آب سبز به ردپای آب ملی برای گندم، جو و ذرت به‌ترتیب ۴۷٪، ۴۲٪ و ۲٪ بود. این نتایج نشان می‌دهد که تولید گندم و جو به‌طور قابل توجهی مصرف‌کنندگان بزرگ منابع آبی سبز (یعنی بارش مؤثر) هستند (Ababaei & Ramezani Etedali, 2017). در پژوهشی در ترکیه که به تجزیه و تحلیل ردپای آب ملی آبی و سبز در تولید و مصرف آب مجازی بین سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۹ انجام شده است. نتایج ردپای آب کل تولید شده و مصرف شده گندم در ترکیه به‌ترتیب ۳۳/۹ و ۴۸/۱ گرم مکعب در سال محاسبه شد (Muratoglu, 2020). محققان هندی با هدف تجزیه و تحلیل تغییرپذیری زمانی عوامل اقلیمی و ردپای آب برنج و گندم طی دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۶ در لودیانا، پنجاب مطالعه‌ای انجام دادند. هدف آنها شناسایی عوامل آب و هوایی غالب است که باعث تغییر در ردپای آب در برنج و گندم می‌شود. نتایج آنها نشان داد ردپای آبی کل برنج و گندم روند کاهشی قابل توجهی را در ۳۲ سال گذشته نشان می‌دهد. مدت تابش آفتاب و سرعت باد به‌ترتیب عوامل مؤثر بر تغییرپذیری کل ردپای آب برنج و گندم بودند، در حالی‌که بارندگی به شدت بر ردپای آب سبز و آبی برنج و گندم تأثیر گذاشت (Kashyap & Agarwal, 2020). طی پژوهشی، به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی CM-GFDL3 تحت دو سناریوی پرکاربرد RCP ۴,۵ و RCP ۸,۵ در دو دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ و ۲۰۹۰-۲۰۴۱ در شش اقلیم مختلف ایران پرداخته شد و با استفاده از نتایج آن، محاسبات پیش‌بینی ردپای آب محصولات کشاورزی در دو جزء ردپای آب آبی و آب سبز انجام گردید و سپس داده‌های ۴۰ ساله آماری هواشناسی آنها وارد مدل ریزمقیاس کننده‌ی LARS-WG گردید و با تولید ۱۰۰ سری داده به تولید داده‌های هواشناسی در دوره‌های زمانی مورد نظر پرداخته شد. نتایج نشان داد که در طی دوره‌های آتی تغییرات ردپای آب سبز و آبی محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران به‌ترتیب از -۴۴/۱۴ درصد تا ۱۴/۴۱ درصد در ردپای آب سبز و -۱۱/۱۸ درصد تا ۱۰/۴۸ درصد در ردپای آب آبی می‌گردد (Ghorbani *et al.*, 2020). در پژوهشی به‌منظور بررسی روند سالانه ردپای آب در تولید گندم در شهرهای استان اصفهان و انتخاب مناسب‌ترین شهر این استان برای کشت گندم، وجود روند در سری زمانی ردپای آب در تولید گندم را طی دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۶۹، از آزمون روندیابی من کندال و تخمین‌گر شیب سن استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار شاخص ردپای آب در تولید یک محصول در یک منطقه، معیار قابل‌قبولی برای انتخاب آن منطقه برای کشت آن محصول نیست و با بررسی روند این شاخص و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری همچون انتخاب اجتماعی، می‌توان منطقه مناسب برای کشت هر محصول را تشخیص داد و تغییر الگوی کشت را در سیاست کار خود به‌منظور حفظ منابع آبی و افزایش بهره‌وری محصولات قرار داد. در این مطالعه از نظر رد پای آب، فریدون‌شهر به‌عنوان بهترین شهر برای کشت گندم در استان اصفهان انتخاب شد (Golabi *et al.*, 2019). علیقلی‌نیا و همکاران (Aligholinya *et al.*, 2019) به ارزیابی ردپای آب محصول گندم در نقاط استراتژیک از نظر منابع آب (آب آبی، آب سبز و آب خاکستری) و ارائه الگوی کشت بهینه در اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته‌اند. ۳۳ استان کشور را براساس اقلیم‌بندی یونسکو طبقه‌بندی کردند. تمامی ایستگاه‌ها در ۶ اقلیم، خیلی مرطوب خنک گرم (PH-C-W)، نیمه‌خشک سرد گرم (SA-K-W)، نیمه‌خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW)، خشک خنک گرم (A-C-W)، خشک معتدل گرم (A-M-W) و خشک خنک خیلی گرم (A-C-VW) دسته بندی کردند. ردپای آب محصول در هر سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری در هر اقلیم محاسبه شد. نتایج نشان‌داد، بیش‌ترین مقادیر ردپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، بیش‌ترین مقدار ردپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی و بیش‌ترین مقدار ردپای آب خاکستری، در قسمت‌های جنوبی دیده می‌شود. میانگین ردپای آب سبز، آبی و خاکستری به‌ترتیب ۵۰۳/۳، ۱۳۹۲/۸ و ۲۸۶/۲ متر مکعب بر تن بدست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که کشت محصول گندم در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده و در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW ایران توصیه نمی‌گردد (Aligholinya *et al.*, 2019). در تحقیقی برای جلوگیری از بحران آب در منطقه قزوین به بررسی ردپای آب مجازی در چهار دسته ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب خاکستری و ردپای آب سفید در ۱۱ محصول مختلف ازجمله گندم آبی پرداخته‌شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد ردپای آب سبز، ردپای آب آبی، ردپای آب خاکستری و ردپای آب سفید گندم آبی به‌ترتیب ۷۶۹،

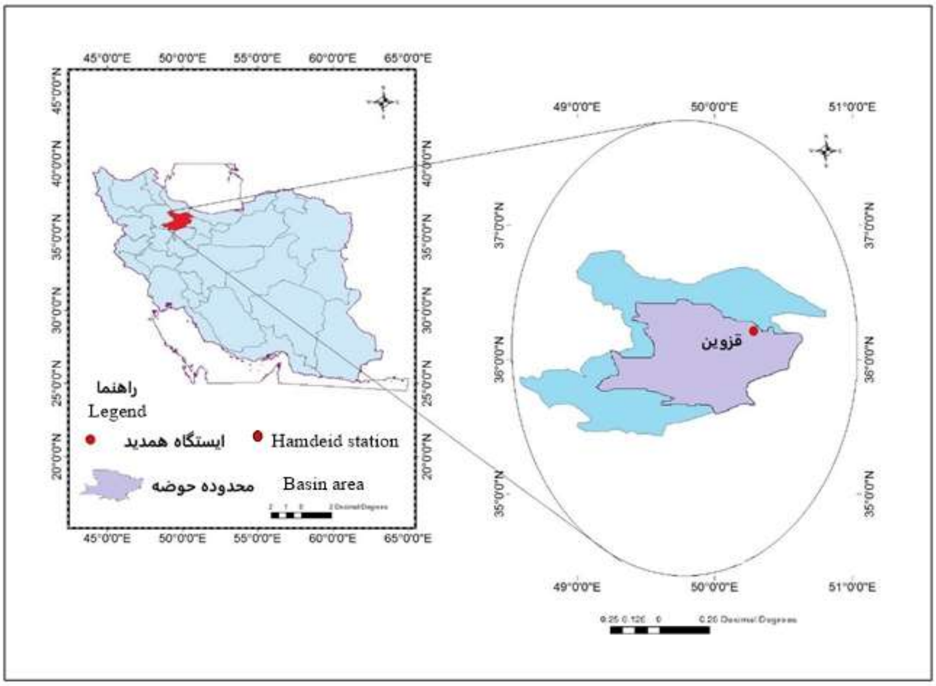
۴۳۷، ۲۷۷، ۱۴۶۷ متر مکعب بر تن برآورد شد. در این مطالعه اثرات تغییرات اقلیمی و کشت در تاریخ‌های مختلف؛ بر میزان ردپای آب سبز رقم پاییزه گندم در دشت قزوین بررسی شد. این بررسی در بازه ۲۱۰۰-۲۰۲۱ و با مقایسه دو منبع اطلاعاتی LARS-WG و DKRZ در تولید داده‌های سالانه تغییر اقلیم و به کارگیری مدل Aquacrop در شبیه‌سازی واکنش گیاه به تغییرات اقلیمی، صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، از داده‌های حاصل از پایگاه اطلاعاتی تحت وب DKRZ و مدل LARS-WG، به‌منظور محاسبه سه متغیر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش، مربوط به ایستگاه همدیدی قزوین و پنج مدل گردش عمومی جو گزارش پنجم IPCC (EC-EARTH, GFDL-CM3, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-MR) تحت دو سناریو انتشار ۴/۵ و ۸/۵ در دورهای آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱، ۲۱۰۰-۲۰۸۱) استفاده شد. با استفاده از داده‌های به‌دست آمده و به‌کارگیری مدل Aquacrop، مقدار تبخیر-تعرق واقعی گندم پاییزه رقم پیشگام در ۵ تاریخ کشت متفاوت (۱۵ مهر، ۱ آبان، ۱۵ آبان، ۳۰ آبان و ۱۵ آذر) محاسبه و میزان تغییرات آن‌ها نسبت به دوره پایه بررسی شد و تاریخی که اگر کشت در آن صورت گیرد منجر به بیشترین تبخیر-تعرق واقعی و کمترین تبخیر-تعرق واقعی می‌شود؛ معرفی شده است. محدوده مورد مطالعه، دشت قزوین است (شکل ۱). دشت قزوین در محدوده مرکزی استان قزوین می‌باشد که طبق پهنه‌بندی اقلیمی، خشک و سرد است. از ایستگاه سینوپتیک قزوین به‌منظور دریافت اطلاعات پایه (دما حداقل، دما حداکثر و بارش) از سال ۱۹۹۱ تا پایان سال ۲۰۲۰ میلادی استفاده شد. مشخصات جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی ایستگاه مذکور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات اقلیمی و جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک قزوین
Table 1- Climatic and geographical characteristics of Qazvin synoptic station

نوع اقلیم Climate type	ارتفاع از سطح دریا (متر) Height above sea level (meters)	عرض Width (degrees)/length	استان Province
نیمه خشک Semi dry	1297	36,14°N 50,24°E	قزوین Qazvin



شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه و ایستگاه منتخب
Figure 1- Map of the studied area and the selected station

پایگاه‌های مولد داده‌های اقلیمی

در این پژوهش از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG و پایگاه اطلاعاتی تحت وب DKRZ به‌منظور تولید داده‌های اقلیمی دما حداقل، دما حداکثر و بارش در دوره‌های آتی (۲۱۰۰–۲۰۲۱) استفاده شد.

LARS-WG

LARS- WG یک مولد تصادفی آب و هوا است که با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی حال و آینده اقدام به تولید سری زمانی پارامترهای هواشناسی می‌کند. این ابزار از توزیع نیمه تجربی (Emp) برای طول سری‌های روزانه خشک و تر، بارش روزانه و تابش خورشیدی روزانه استفاده می‌کند.

$$EMP = a_0 , a_i , h_i \ldots \qquad i = 1, 2, 3, \ldots , 23 \qquad (۱)$$

در این رابطه Emp یک هیستوگرام با تعداد فواصل ۲۳ است (در نسخه‌ی سوم تعداد فواصل ۱۰ بوده است) که در آن a به شرح زیر تعریف شده است.

$$[a_{i-1}, a_i) \qquad a_{i-1} < a_i \qquad (۲)$$

و h تعداد رخدادهای مشاهده شده در i امین فاصله است. چنین توزیعی انعطاف‌پذیر است و می‌تواند با تنظیم فواصل، تقریبی از انواع مختلفی از شکل‌ها باشد. فواصل $[a_{i-1}, a_i)$ براساس خواص مورد انتظار از متغیرهای آب و هوا انتخاب می‌شوند. برای تابش خورشیدی، این فواصل به‌طور مساوی بین مقادیر کمینه و بیشینه داده‌های مشاهداتی ماهانه می‌باشد. حداقل دما، حداکثر دما و تابش خورشیدی مربوط به میانگین پوشش ابر است؛ بنابراین LARS-WG از توزیع جداگانه‌ای برای روزهای تر و خشک برای هر یک از این متغیرها استفاده می‌کند. در ورژن‌های مختلف LARS-WG، گزارش‌های مختلف تغییر اقلیم تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده است. در این پژوهش، جدیدترین ورژن یعنی سری ششم به کار گرفته شده است. در سری ششم مدل LARS-WG گزارش‌های پنجم گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوهای مختلف وجود دارد که توسط کشورهای مختلف ارائه شده‌اند. در این پژوهش از مدل‌های گردش عمومی جو استفاده شده است. سناریوهای مربوط به هر GCM در جدول ۲ آورده شده است.

پایگاه اطلاعاتی تحت وب DKRZ

مرکز محاسبات اقلیمی آلمان (DKRZ: Deutsches Klimarechenzentrum GmbH) یک سرویس بایگانی طولانی مدت را برای مجموعه داده‌های تحقیقاتی بزرگ که مربوط به تحقیقات اقلیم یا سیستم زمین است فراهم می‌کند. این سرویس شامل قابلیت بایگانی و بازیابی داده‌ها برای بازه‌های زمانی ۱۰ ساله یا بیشتر است. بایگانی طولانی مدت DKRZ (LTA) طبق ضوابط Core Trust Seal (CTS) تأیید شده است و به‌عنوان مرکز داده جهانی آب و هوا (WDCC) به‌عنوان عضو منظم سیستم داده جهانی معتبر است. داده های دما حداکثر (درجه کلوین)، دما حداقل (درجه کلوین) و بارش (کیلوگرم بر متر مربع در هر ثانیه) برای مدل‌های EC-EARTH، GFDLCM3، HadGEM2-Es، MIROC5 و MPI-ESM-MR در سال‌های آماری ۱۹۹۱–۲۰۲۰ از این پایگاه اطلاعاتی دانلود شد. فایل‌های دانلود شده با فرمت NC هستند که به‌منظور تبدیل فرمت به TXT در محیط ARCGIS فراخوانی شدند. سپس تبدیل واحدهای لازم برای دما و بارش صورت گرفت تا داده‌های دما بر حسب سانتی گراد و بارش بر حسب میلی‌متر در روز شوند.

جدول ۲- GCM همراه با سناریوهای مربوطه
Table 2- GCM with related scenarios

GCM	Scenario
EC-EARTH	rcp 4/5
	rcp 8/5
GFDL-CM3	rcp 4/5
	rcp 8/5
HadGEM2-ES	rcp 4/5
	rcp 8/5
MIROC5	rcp 4/5
	rcp 8/5
MPI-ESM-MR	rcp 4/5
	rcp 8/5

داده‌های دمای حداکثر (درجه کلوین)، دمای حداقل (درجه کلوین) و بارش (کیلوگرم بر مترمربع در هر ثانیه) برای مدل‌های EC-EARTH، GFDLCM3، HadGEM2-Es، MIROC5 و MPI-ESM-MR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCP) ۴/۵ و ۸/۵ در سال‌های آماری ۲۰۲۱–۲۱۰۰ دانلود شد. فایل‌های دانلود شده با فرمت NC بودند که در محیط ARCGIS فراخوانی شدند و به فایل TXT تبدیل شدند. سپس تبدیل واحدهای لازم برای دما و بارش صورت گرفت تا داده‌های دما بر حسب سانتی‌گراد و بارش بر حسب میلی‌متر در روز شوند.

ایستگاه همدید

داده‌های روزانه ی دما حداقل (درجه سلسیوس)، دما حداکثر (درجه سلسیوس)، بارش (میلی‌متر در روز) و ساعت آفتابی (تعداد ساعت در طول یک شبانه‌روز) در بازه زمانی سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۲۰ از ایستگاه سینوپتیک قزوین اخذ گردید. بر روی داده‌ها ارزیابی صورت گرفت. از آنجایی که دوره ۲۰ ساله برای مراحل بعدی داده‌ها مناسب بود، داده

های دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به‌منظور داده‌های پایه انتخاب گردید. به منظور تولید داده‌های تغییر اقلیم در مدل LARS-WG، ابتدا می‌بایست مجموعه‌ای از داده‌های (دما حداقل، دما حداکثر، بارش و ساعت آفتابی) در طول بازه‌ای چند ساله، تحت عنوان داده‌های پایه به نرم‌افزار داده شود. در این پژوهش، داده‌های ایستگاه سینوپتیک قزوین در طول سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ به‌عنوان داده‌های پایه انتخاب شد. برای معرفی داده‌های پایه به مدل LARS-WG، می‌بایست داده‌ها به‌ترتیب شماره سال، روز ژولیوسی، دما حداقل (درجه سلسیوس)، دما حداکثر (درجه سلسیوس)، بارش (میلی‌متر در روز) و ساعت آفتابی (تعداد ساعت در طول یک شبانه‌روز) در ستون‌های مجزا مرتب شوند. با فرمت DAT به مدل معرفی شوند. مشخصات ایستگاه موردنظر از جمله، طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا، با فرمت St نیز آماده شود و به مدل LARS-WG جهت تولید داده‌ها داده شود.

بررسی مقادیر عملکرد گندم پاییزه در شرایط پایه و شرایط تغییر اقلیم براساس یافته‌های LARS-WG و DKRZ

از میانگین داده‌های ۵ مدل گردش عمومی جو تحت سه متغیر دما حداقل، دما حداکثر و بارش به تفکیک داده‌های LARS-WG و داده‌های پایگاه اطلاعاتی DKRZ و سناریوهای انتشار ۴/۵ و ۸/۵ استفاده شد و به‌منظور تولید پارامترهای عملکرد، بارش، تاریخ برداشت محصول به مدل Aquacrop معرفی شد.

رقم گندم پیشگام

اصلاح رقم جدید گندم پیشگام با شجره (Bkt/90-Zhong87) در سال ۱۳۷۴ با دو رگ‌گیری (با شماره کراس ۱۴۶۵۸–۱) در بخش تحقیقات غلات مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر آغاز شد. هدف از دو رگ‌گیری انتقال مقاومت به انواع زنگ‌ها به‌ویژه زنگ زرد و نیز تحمل نسبی به تنش خشکی از رقم زمستانه چینی 90-Zhong 87 به یک رقم تیپ بینابینی و پر محصول ایرانی ولی حساس به زنگ زرد به نام برکت بود. میزان تحمل آن به انجماد بیشتر از اکثر ارقام متداول اقلیم سرد است. این رقم به علت مقاومت به خوابیدگی در شرایط سیستم آبیاری بارانی نسبت به دیگر ارقام ارجعیت دارد (Sadrabadi Haghighi & Sakhavati, 2017). متوسط عملکرد آن در شرایط معمول ۷/۵ تن در هکتار می‌باشد. در این تحقیق مطالعه روی گندم آبی بدون تنش و با آبیاری کامل است.

دوره رشد گندم پیشگام

به‌طور خلاصه، مراحل مختلف رشد گیاه گندم به قرار ذیل می‌باشد:

۱– مرحله ساقه رفتن: با افزایش درجه حرارت گیاه مجدداً رشد خود را آغاز نموده و در مدتی کوتاه هر پنجه تبدیل به ساقه‌ای شده و توسعه می‌یابد. در این تحقیق از کاشت تا تاریخ ۹۸/۰۲/۱۷ (موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، ۱۳۹۵)

۲– مرحله تشکیل سنبله: در نیمه دوم اردیبهشت ماه پس از آنکه ساقه گندم به اندازه کافی رشد کرد، از انتهای فوقانی ساقه از میان غلاف برگ پرچم، ابتدا نوک ریشک‌ها و سپس سنبله ظاهر می‌شود (از ۹۸/۰۲/۱۷ تا ۹۷/۰۲/۳۱)

۳– مرحله گرده‌افشانی: پس از آنکه سنبله از درون غلاف برگ‌ها بیرون آمد، عمل گرده‌افشانی صورت می‌پذیرد که حدود یک هفته طول می‌کشد. درجه حرارت مناسب برای گرده‌افشانی ۲۲ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد است (در این تحقیق از ۹۷/۰۳/۴ تا ۹۸/۰۲/۳۱) (مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، ۱۳۹۵).

۴– مرحله پر شدن دانه: گندم زمستانه به ۱۸۰ تا ۲۵۰ نیاز دارد. دمای مناسب برای پنجه‌زنی گندم بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. آبیاری کردن در زمان متورم شدن ساقه یا تشکیل خوشه از تشکیل گل‌های نازا جلوگیری می‌کند. برای خوشه‌ها آب باید در دسترس باشد تا با جذب آب مرحله خوشه به حداکثر رشد خود برسد. در صورتی‌که در این مرحله آب در دسترس نباشد، موادغذایی هم به سختی جذب می‌شود و برخی از خوشه‌ها به سرانجام نمی‌رسند و برخی نیز کوچک‌تر می‌شوند و در نتیجه تعداد دانه در خوشه و در کل بوته کاهش می‌یابد (Kyani, 2017).

عملکرد (Yield)

مقدار کل ماده خشک تولید شده را عملکرد محصول می‌گویند. مقدار این پارامتر به‌طور مستقیم توسط مدل Aquacrop تولید شد اما این مدل به‌منظور محاسبه این پارامتر از رابطه (۳) استفاده کرده است.

$$Y = HI \times Biomass \qquad (۳)$$

Y در این رابطه همان عملکرد بر حسب (ton/ha)، HI شاخص برداشت برای شکست گرده‌افشانی، فتوسنتز ناکافی و تنش آبی بر حسب (درصد) و Biomass زیست‌توده تجمعی (شامل ریشه و شاخ و برگ) تولید شده بر حسب (ton/ha) است.

ردپای آب سبز (Green water footprint)

آب سبز به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به‌صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود. این منبع آبی در مناطق دیم به صورت مؤثر صرف تعرق گیاهی می‌شود و یا از سطح خاک و آب‌های آزاد به صورت تبخیر از دسترس خارج می‌گردد (Obuobie, 2005). ردپای آب سبز به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$WF_G = \frac{10 \times R}{Y} \qquad (۴)$$

که در آن WF_G ردپای آب سبز بر حسب (m^3/ton)، R مقدار بارش مؤثر بر حسب (mm) و Y عملکرد محصول بر حسب (ton) می‌باشند.

تاریخ کشت گندم پاییزه ۶ نوامبر (۱۵ آبان) در نظر گرفته شد. اما از آنجایی که تأثیر تاریخ کشت بر میانگین ردپای آب سبز، محصول نیز برای بررسی مدنظر بود، تاریخ‌های کشت به فاصله ۱۵ و ۳۰ روز جلوتر و عقب‌تر از تاریخ مورد نظر نیز، جهت بررسی به مدل معرفی شدند. یعنی تاریخ‌های ۷ اکتبر (۱۵ مهر)، ۲۳ اکتبر (۱ آبان)، ۲۱ نوامبر (۳۰ آبان) و ۶ دسامبر (۱۵ آذر). مقدار متغیر (ردپا آب سبز) محصول (گندم پاییزه) که در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG و پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ و در تاریخ‌های کشت متفاوت، در ۴ دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) پیش‌بینی شده‌اند، بررسی شدند. روند تغییرات آن (افزایش یا کاهش) و بیش‌ترین و کم‌ترین این متغیرها در طول این دوره‌ها، مدل و سناریویی که تحت آن بیش‌ترین و کم‌ترین این متغیرها را گزارش می‌کند، میانگین اختلاف متغیرها در طول دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه در شرایطی که کشت در تاریخ‌های متفاوت صورت گیرد، ارزیابی شدند.

نتایج و بحث

این بررسی در بازه ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ و با مقایسه دو منبع اطلاعاتی LARS-WG و DKRZ در تولید داده‌های سالانه تغییر اقلیم و به کارگیری مدل Aquacrop در شبیه‌سازی واکنش گیاه به تغییرات اقلیمی در تاریخ‌های متفاوت کشت صورت گرفت.

پاییزه- تاریخ کشت ۷ اکتبر (۱۵ مهر)

طبق نتایج مدل Aquacrop همانطور که در شکل ۲ و شکل ۳ قابل مشاهده است، میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در دوره پایه در صورتی‌که کشت در تاریخ ۱۵ مهر ماه انجام گیرد برابر ۱۱۹۷ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۵۹۳/۷ متر مکعب بر تن گزارش می‌شود.

نتایج ردپای سبز حاصل از شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵ نشان می‌دهد که اگر تاریخ کشت در ۱۵ مهرماه صورت گیرد، در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۰ ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش خواهد یافت و میانگین آن به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۱۲۴۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۱۰۳ متر مکعب بر تن) و ۴۲۷۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۰۱۸ متر مکعب بر تن) خواهد بود لذا، ۵۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۴۸/۳۵ متر مکعب بر تن) و ۳۰۷۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۲۸۰۵/۸۵ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز این محصول در دوره پایه، افزایش ردپای آب سبز پیش‌بینی می‌شود (مطابق شکل ۲ و شکل ۳). ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰، به‌ترتیب برابر ۴۲۶/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۹/۶۳ متر مکعب بر تن) و ۳۷۸/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۳/۶۷ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود؛ لذا تحت این شرایط، ۷۷۰/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۳۲۶/۶۶ متر مکعب بر تن) و ۸۱۸/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۳۳۳/۶۸ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه،کاهش می‌یابد. کمترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵ در دوره ۲۰۸۱-۲۱۰۰ اتفاق می‌افتد.

میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵، به غیر از دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ در بقیه دوره‌ها (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) کاهش خواهد یافت. مقدار آن در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۷۷۶/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۴۹/۷ متر مکعب بر تن)، ۴۲۵/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۲۰۸/۶ متر مکعب بر تن) و ۳۹۹/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۳۴۷/۶ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۴۲۰/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۲۱/۷ متر مکعب بر تن)، ۷۷۱/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۰۱/۱۵ متر مکعب بر تن) و ۷۹۷/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۷۰/۶۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه،کاهش می‌یابد. در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ مقدار ردپای آب سبز برابر ۴۲۴۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۲۳۰۰ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود که ۳۰۴۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۴۶/۸۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه، افزایش می‌یابد.

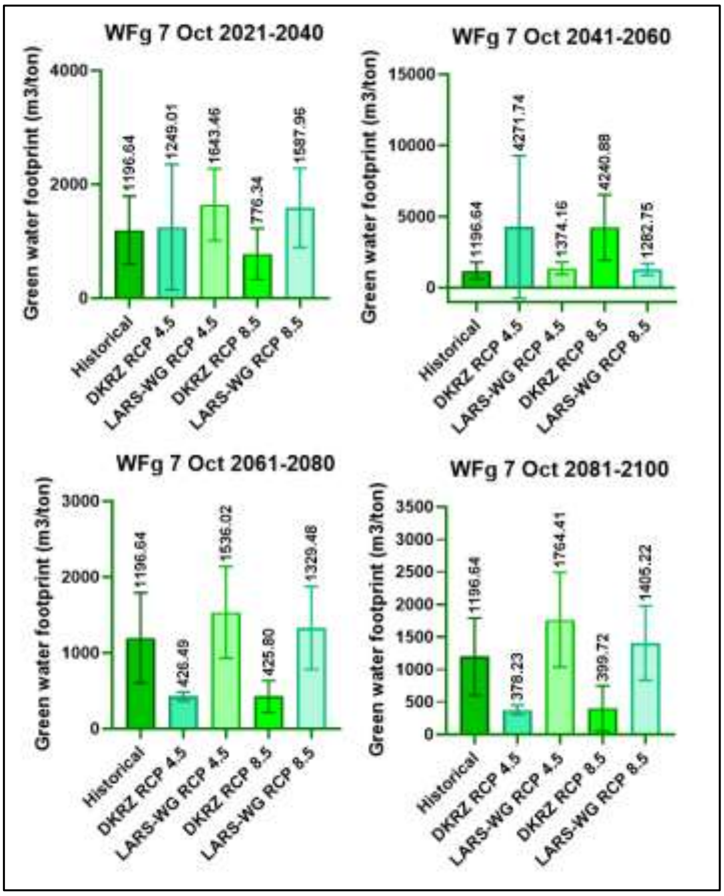
در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۴/۵، در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش خواهد یافت که افزایش به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۱۶۴۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۳۱ متر مکعب بر تن)، ۱۳۷۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۲۸/۱ متر مکعب بر تن)، ۱۵۳۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۰۳/۹ متر مکعب بر تن) و ۱۷۶۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۲۶/۲ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۴۴۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۱۲/۳۵ متر مکعب بر تن)، ۱۷۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۱۰/۹ متر مکعب بر تن)، ۳۳۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۹۸/۸ متر مکعب بر تن) و ۵۶۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۵۹/۹۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه، افزایش می‌یابد. بیشترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۴/۵ در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ اتفاق می‌افتد.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵، در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و

۲۱۰۰-۲۰۸۱ میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش می‌یابد که به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۱۵۸۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۹۴/۷ متر مکعب بر تن)، ۱۲۸۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۱۶/۴ متر مکعب بر تن)، ۱۳۲۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۴۷ متر مکعب بر تن) و ۱۴۰۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۷۱/۷ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۳۹۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۴۴/۲ متر مکعب بر تن)، ۸۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۰۵/۰۵ متر مکعب بر تن)، ۱۳۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۷۰/۳۵ متر مکعب بر تن) و ۲۰۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۸۲/۷ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه، افزایش می‌یابد.

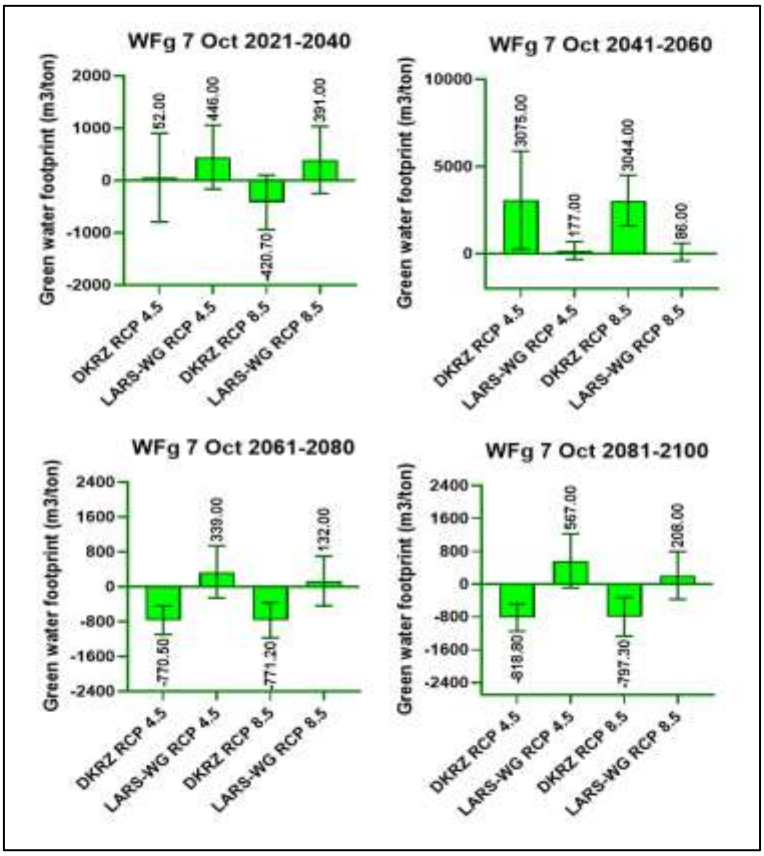
ردپای آب سبز گندم پاییزه- تاریخ کشت ۲۳ اکتبر (۱ آبان)

طبق نتایج مدل Aquacrop همانطور که در شکل ۴ و شکل ۵ قابل مشاهده است، میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در دوره پایه در صورتی‌که کشت در تاریخ ۱ آبان ماه انجام گیرد برابر ۴۱۷/۳ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۱۱۹/۹ متر مکعب بر تن خواهد بود.



شکل ۲- ردپای آب سبز گندم پاییزه تحت شرایط اقلیمی دوره پایه و میانگین مدل‌های گردش عمومی جو GCM در سناریوهای ٤/٥ و ٨/٥، در ٤ بازه زمانی دوره آتی در صورتی‌که تاریخ کشت ۱۵ مهر ماه در نظر گرفته شود.

Figure 2- The green water footprint of autumn wheat under the climatic conditions of the base period and the average of GCM general circulation models in scenarios 4.5 and 8.5, in the 4 time frames of the future period if the planting date is considered to be 7 October.



شکل ۳- تغییرات متوسط ردپای آب سبز گندم پاییزه دشت قزوین در ٤ بازه زمانی آتی و تحت شرایط اقلیمی سناریوهای ٤/٥ و ٨/٥ پایگاه اطلاعاتی DKRZ و مدل LARS-WG، نسبت به شرایط اقلیمی پایه؛ در صورتی که تاریخ کشت محصول ۱۵ مهر ماه در نظر گرفته شود.

Figure 3- The average changes in the green water footprint of Qazvin plain autumn wheat in the next 4 time frames and under the climatic conditions of scenarios 4.5 and 8.5 of the DKRZ database and the LARS-WG model, compared to the basic climatic conditions; If the planting date is considered to be 7 October.

نتایج ردپای سبز حاصل از شرایط اقلیمی پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵ نشان می‌دهد که اگر تاریخ کشت در ۱ آبان ماه صورت گیرد، در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش خواهد یافت و میانگین آن به ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۴۵۳/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۵/۹۵ متر مکعب بر تن) و ۶۲۴/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۳۲۲/۹ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا، ردپای آب سبز در این دوره‌ها به‌ترتیب ۳۵/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۲/۹۲ متر مکعب بر تن) و ۲۰۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۲۲۱/۴ متر مکعب بر تن) نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد یافت (مطابق شکل ۴ و ۵). ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهش می‌یابد. این مقدار به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۴۱۵/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۸/۵۵ متر مکعب بر تن) و ۳۶۵/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۹/۷ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا تحت این شرایط، ۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۹/۲۲ متر مکعب بر تن) و ۵۲/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۹/۸ متر مکعب بر تن) کاهش ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه، گزارش می‌شود. بیشترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵ و در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ اتفاق می‌افتد.

ردپای سبز حاصل از شرایط اقلیمی پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش خواهد یافت و میانگین آن به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۵۳۲/۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۲۳۰ متر مکعب بر تن) و ۵۵۸/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۶۵/۸ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا، ۱۱۵/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۷۴/۹۵ متر مکعب بر تن) و ۱۴۱/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۲/۸۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهش می‌یابد این مقدار به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۴۹/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۵۷ متر مکعب بر تن) و ۲۶۰/۱ متر مکعب بر تن (با

انحراف معیار ۵۸/۴ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا تحت این شرایط، ۶۷/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۷/۷۳ متر مکعب بر تن) و ۱۵۷/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۹/۱۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. کمترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ اتفاق می‌افتد.

ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به دوره پایه طبق نتایج حاصل از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG تحت سناریو ۴/۵، به غیر از دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در بقیه دوره‌ها (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) کاهش خواهد یافت. مقدار آن در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۴۰۲/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۹/۷ متر مکعب بر تن)، ۳۷۱/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۷/۷۹ متر مکعب بر تن) و ۳۶۳/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۱۷/۲ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۱۴/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۳۴/۸ متر مکعب بر تن)، ۴۶/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۸/۸۴ متر مکعب بر تن) و ۵۳/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۱۸/۵۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش پیدا می‌کند. در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ مقدار آن برابر ۴۳۹/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۶۵/۱ متر مکعب بر تن) است که ۲۲/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۲/۵ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز در دوره پایه افزایش مصرف آب پیش‌بینی می‌شود.

ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به دوره پایه در شرایط اقلیمی حاصل از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG تحت سناریو ۸/۵، به غیر از دوره ۲۰۸۰-۲۰۴۱ در بقیه دوره‌ها (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) کاهش خواهد یافت. مقدار آن در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ به ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۹۶/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۶/۴ متر مکعب بر تن)، ۳۳۲/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۵/۸۵ متر مکعب بر تن) و ۳۰۵/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۰۲/۶ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۲۰/۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۳۳/۱۵ متر مکعب بر تن)، ۸۵/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۲/۸۷ متر مکعب بر تن) و ۱۱۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۱۱/۲۵ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز این محصول در دوره پایه کاهش مصرف آب خواهیم داشت. در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ مقدار آن برابر ۴۱۸/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۶۳/۴ متر مکعب بر تن) است که ۱/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۴۱/۶۵ متر مکعب بر تن) افزایش ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه گزارش می‌شود.
Sw

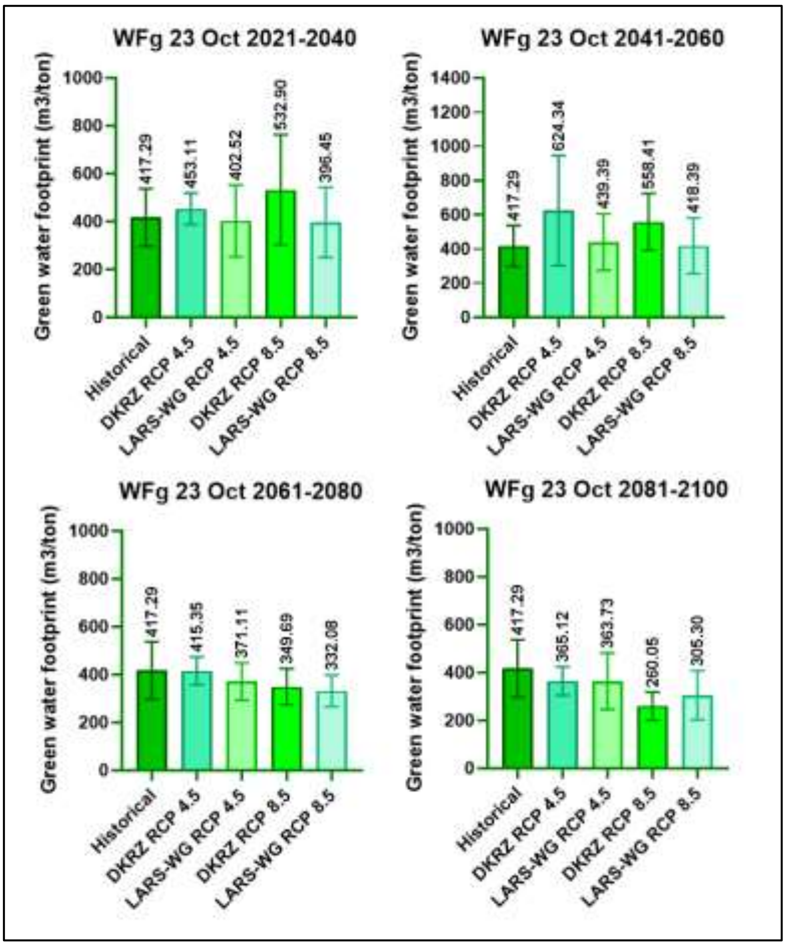
ردپای آب سبز گندم پاییزه- تاریخ کشت ۶ نوامبر (۱۵ آبان)

طبق نتایج مدل Aquacrop همانطور که در شکل ۶ و شکل ۷ نیز قابل مشاهده است، میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در دوره پایه در صورتی‌که کشت در تاریخ ۱۵ آبان ماه انجام گیرد برابر ۳۴۳/۸ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۹۵/۱۸ متر مکعب بر تن خواهد بود.

در شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵، در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میانگین ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش می‌یابد که به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۴۰۴/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۵/۹۳ متر مکعب بر تن)، ۴۰۲/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۶/۳۱ متر مکعب بر تن)، ۴۰۷/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۹/۳۷ متر مکعب بر تن) و ۳۵۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۰/۰۳ متر مکعب بر تن) خواهد بود. لذا ۶۰/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۰/۵۵ متر مکعب بر تن)، ۵۸/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۰/۷۴ متر مکعب بر تن)، ۶۳/۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۷/۲۷ متر مکعب بر تن) و ۹/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۷/۶ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش خواهد داشت (مطابق شکل ۶ و ۷). بیشترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵ و در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ اتفاق می‌افتد.

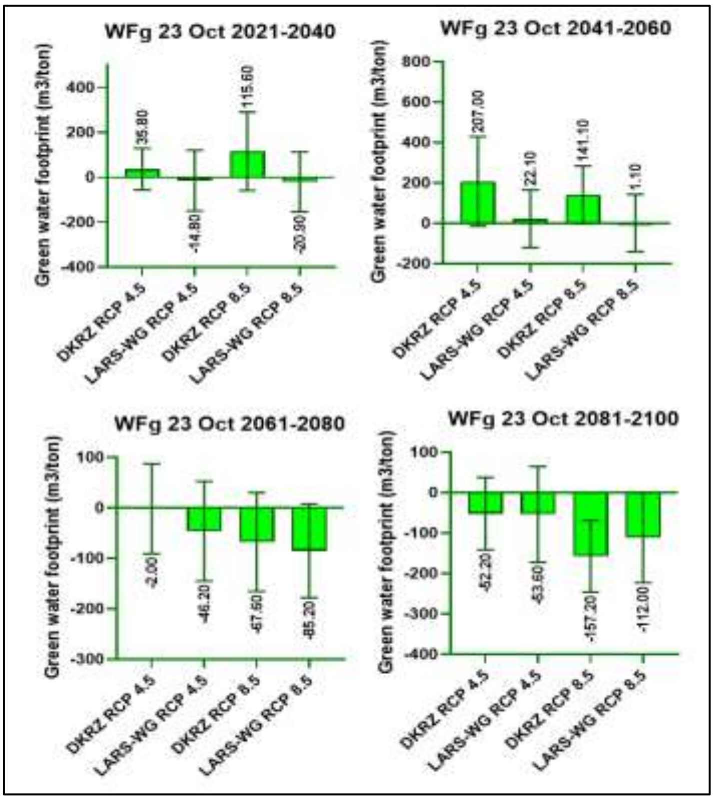
ردپای سبز حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش می‌یابد و میانگین آن به ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۸۵/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۸/۷۴ متر مکعب بر تن) و ۳۸۳/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۱ متر مکعب بر تن) خواهد شد. لذا، ۴۱/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۱/۹۶ متر مکعب بر تن) و ۳۹/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۳/۰۹ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش خواهد داشت. ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهش می‌یابد. این مقدار به‌ترتیب دوره های ذکر شده برابر ۳۴۱/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۴/۸۷ متر مکعب بر تن) و ۲۵۵/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۸/۵۴ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا تحت این شرایط، ۲/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۵/۰۲ متر مکعب بر تن) و ۸۸/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۶/۸۶ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه کاهش خواهد داشت. کمترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ اتفاق می‌افتد.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۴/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۳۳/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۰/۷۱ متر مکعب بر تن)، ۳۲۳/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۱۰۰ متر مکعب بر تن)، ۳۰۸/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۱/۲۷ متر مکعب بر تن) و ۳۱۱/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۲/۵۴ متر مکعب بر تن) خواهد بود. این کاهش نسبت به دوره پایه به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده، برابر ۱۰/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۷/۹۴ متر مکعب بر تن)، ۲۰/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۷/۵۹ متر مکعب بر تن)، ۳۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۸/۲۲ متر مکعب بر تن) و ۳۲/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۳/۸۶ متر مکعب بر تن) گزارش می‌شود.



شکل ٤- ردپای آب سبز گندم پاییزه تحت شرایط اقلیمی دوره پایه و میانگین مدل‌های گردش عمومی جو GCM در سناریو های ٤/٥ و ٨/٥، در ٤ بازه زمانی دوره آتی در صورتی که تاریخ کشت ۱ آبان ماه در نظر گرفته شود.

Figure 4- The green water footprint of autumn wheat under the climatic conditions of the base period and the average of GCM atmospheric general circulation models in scenarios 4.5 and 8.5 in the 4 time frames of the future period, if the planting date of 23 October is considered.



شکل ۵. تغییرات متوسط ردپای آب سبز گندم پاییزه دشت قزوین در ٤ بازه زمانی آتی و تحت شرایط اقلیمی سناریوهای ٤/٥ و ٨/٥ پایگاه اطلاعاتی DKRZ و مدل LARS-WG، نسبت به شرایط اقلیمی پایه؛ در صورتی که تاریخ کشت محصول ۱ آبان ماه در نظر گرفته شود.

Figure 5- The average changes in the green water footprint of Qazvin plain autumn wheat in the next 4 time periods and under the climatic conditions of scenarios 4.5 and 8.5 of the DKRZ database and the LARS-WG model, compared to the basic climatic conditions; If the planting date of the crop is considered to be 23 October.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۳۲/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۱/۶۶ متر مکعب بر تن)، ۳۱۴/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۹/۵۱ متر مکعب بر تن)، ۲۷۹/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۶/۲۹ متر مکعب بر تن) و ۲۶۱/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۳/۲۹ متر مکعب بر تن) خواهد بود و ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده، ۱۱/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۸/۴۲ متر مکعب بر تن)، ۲۹/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۷/۳۴ متر مکعب بر تن)، ۶۴/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۷۳ متر مکعب بر تن) و ۸۲/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۹/۲۳ متر مکعب بر تن) کاهش خواهد یافت.

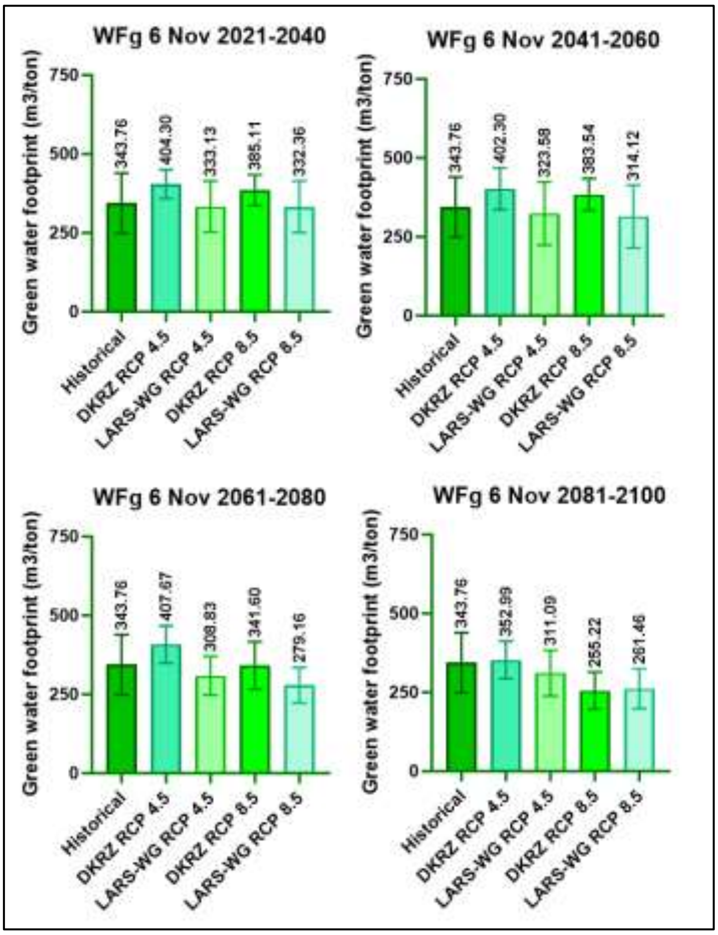
ردپای آب سبز گندم پاییزه- تاریخ کشت ۲۱ نوامبر (۳۰ آبان)

طبق نتایج مدل Aquacrop همانطور که در شکل ۸ و شکل ۹ قابل مشاهده است، میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در دوره پایه در صورتی‌که کشت در تاریخ ۳۰ آبان ماه انجام گیرد برابر ۳۲۹/۸ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۹۳/۶۳ متر مکعب بر تن است.

در شرایط اقلیمی متوسط مدل‌های گردش عمومی جو حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵، در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش می‌یابد که به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۸۱/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۲/۲۷ متر مکعب بر تن)، ۳۸۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۶/۴۹ متر مکعب بر تن)، ۳۹۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۴/۳۷ متر مکعب بر تن) و ۳۳۹/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۶/۷۳ متر مکعب بر تن) گزارش می‌شود. لذا ۵۱/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۷/۹۵ متر مکعب بر تن)، ۵۳/۲ متر مکعب بر تن (با

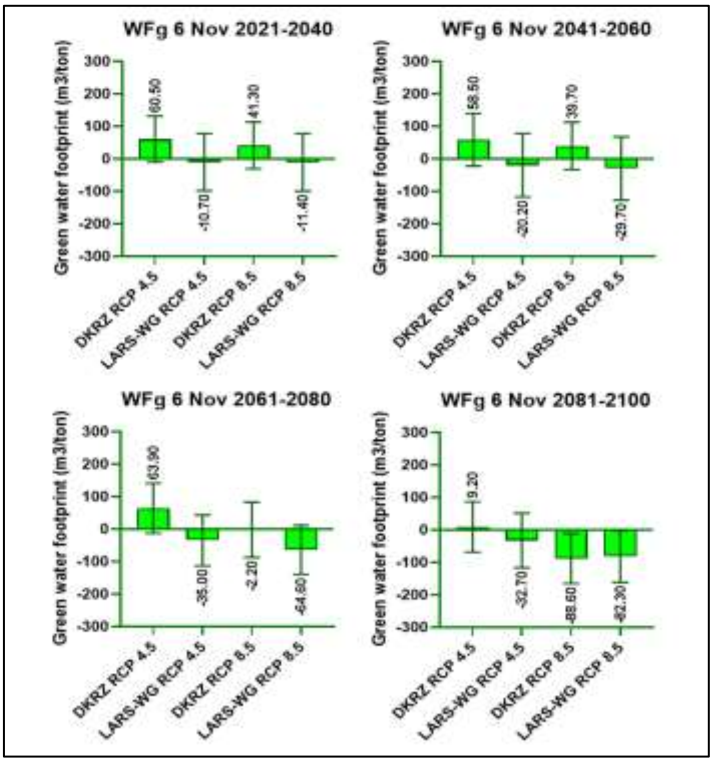
انحراف معیار ۸۰/۰۶ متر مکعب بر تن)، ۶۴/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۴ متر مکعب بر تن) و ۹/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۱۸ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت (مطابق شکل ۸ و ۹). بیشترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰ اتفاق می‌افتد.

ردپای سبز حاصل از شرایط اقلیمی پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ نشان می‌دهد که در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش خواهد یافت و میانگین آن به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۶۸/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۴/۱۲ متر مکعب بر تن) و ۳۶۷/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۶/۶۸ متر مکعب بر تن) است. لذا، ۳۸/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۸/۸۷ متر مکعب بر تن) و ۳۷/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۰/۱۵ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه، افزایش خواهد داشت. ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهش می‌یابد. این مقدار به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۲۹/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۵۸ متر مکعب بر تن) و ۲۴۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۸/۲۸ متر مکعب بر تن) پیش‌بینی می‌شود. لذا تحت این شرایط، ۰/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۴/۶ متر مکعب بر تن) و ۸۱/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۹۵ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز این محصول در دوره پایه، کاهش ردپای آب سبز رخ خواهد داد.



شکل ٦- ردپای آب سبز گندم پاییزه تحت شرایط اقلیمی دوره پایه و میانگین مدل‌های گردش عمومی جو GCM در سناریو های ٤/٥ و ٨/٥، در ٤ بازه زمانی دوره آتی در صورتی که تاریخ کشت ۱۵ آبان ماه در نظر گرفته شود.

Figure 6- The green water footprint of autumn wheat under the climatic conditions of the base period and the average of GCM general circulation models in scenarios 4.5 and 8.5, in the 4 time frames of the future period if the planting date of November 6 is considered.



شکل ۷- تغییرات متوسط ردپای آب سبز گندم پاییزه دشت قزوین در ٤ بازه زمانی آتی و تحت شرایط اقلیمی سناریوهای ٤/٥ و ٨/٥ پایگاه اطلاعاتی DKRZ و مدل LARS-WG، نسبت به شرایط اقلیمی پایه؛ در صورتی که تاریخ کشت محصول ۱۵ آبان ماه در نظر گرفته شود.

Figure 7- The average changes in the green water footprint of Qazvin plain autumn wheat in the next 4 time periods and under the climatic conditions of the 4.5 and 8.5 scenarios of the DKRZ database and the LARS-WG model, compared to the basic climatic conditions; If the date of crop cultivation is considered to be 6th of November.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۴/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۰۸/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۹/۰۱ متر مکعب بر تن)، ۳۰۲/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۷/۹۴ متر مکعب بر تن)، ۳۰۰/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۱/۲۶ متر مکعب بر تن) و ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه به‌ترتیب، ۲۹۱/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۳/۲۶ متر مکعب بر تن) خواهد بود و مقدار این متغیر در دوره های آتی به‌ترتیب، ۲۱/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۶/۳۲ متر مکعب بر تن)، ۲۷/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۵/۷۸ متر مکعب بر تن)، ۲۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۷/۴۴ متر مکعب بر تن) و ۳۸/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۸/۴۴ متر مکعب بر تن) کاهش خواهد داشت.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۰۵/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۹/۶۹ متر مکعب بر تن)، ۲۹۱/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۶/۳۶ متر مکعب بر تن)، ۲۷۰/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۵/۸۵ متر مکعب بر تن) و ۲۴۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۴/۱۳ متر مکعب بر تن) خواهد بود و مقدار این متغیر در دوره‌های آتی به‌ترتیب، ۲۴/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۶/۶۶ متر مکعب بر تن)، ۳۸/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۴/۹۹ متر مکعب بر تن)، ۵۹/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۴/۷۴ متر مکعب بر تن) و ۸۶/۸ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۳/۸۸ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز در دوره پایه کاهش می‌یابد. کمترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ اتفاق می‌افتد.

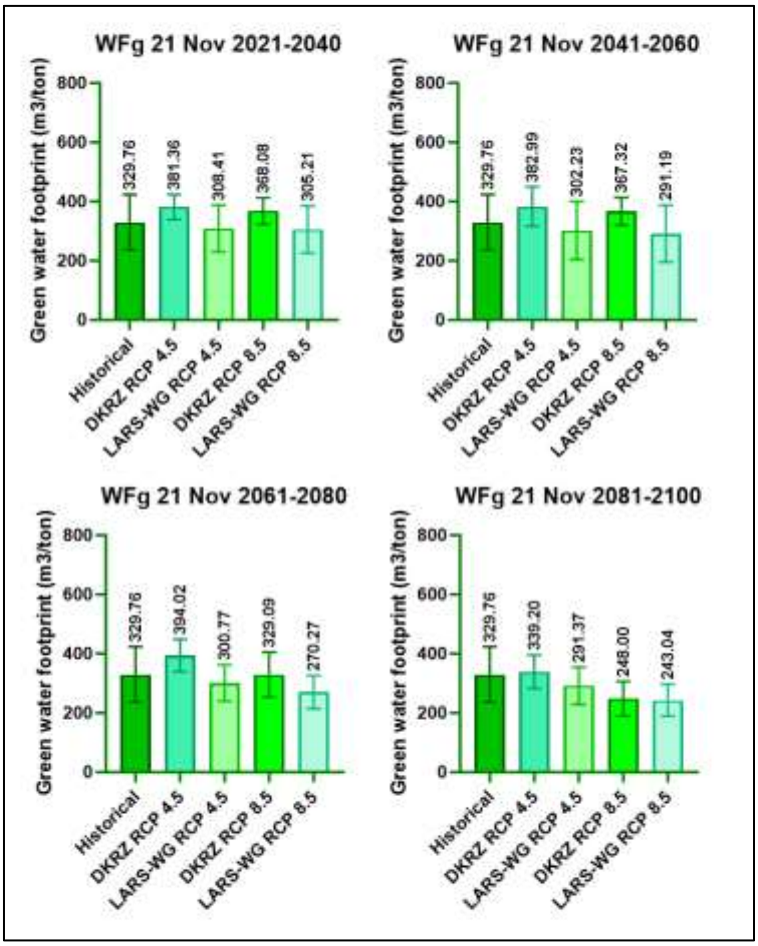
ردپای آب سبز گندم پاییزه- تاریخ کشت ۶ دسامبر (۱۵ آذر)

طبق نتایج مدل Aquacrop همانطور که در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ قابل مشاهده است، میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه در دوره پایه در صورتی‌که کشت در تاریخ ۱۵ آذر ماه انجام گیرد، برابر ۳۱۲/۶ متر

مکعب بر تن با انحراف معیار ۹۳/۷۹ متر مکعب بر تن است.

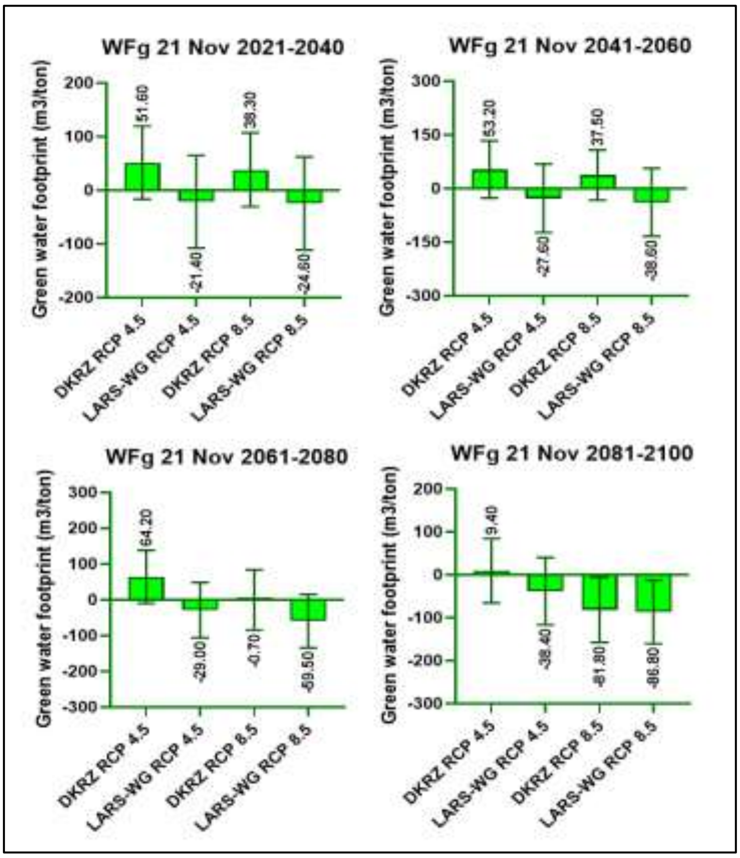
در شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۴/۵، در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میانگین ردپای آب سبز گندم پاییزه نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش می‌یابد که به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۶۱/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۲/۵۴ متر مکعب بر تن)، ۳۶۸/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۵/۰۱ متر مکعب بر تن)، ۳۷۹/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۳/۰۷ متر مکعب بر تن) و ۳۲۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۹/۶ متر مکعب بر تن) گزارش می‌شود. لذا ۴۸/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۸/۱۶ متر مکعب بر تن)، ۵۵/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۹/۴ متر مکعب بر تن)، ۶۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۹/۴۳ متر مکعب بر تن) و ۱۱/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۱/۶۹ متر مکعب بر تن) ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش خواهد داشت (مطابق شکل ۱۰ و ۱۱).

در شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵، در سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ مقدار ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه افزایش خواهد یافت که مقدار آن به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۳۵۱/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۳۹/۴۷ متر مکعب بر تن)، ۳۵۴/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۴۳/۱۲ متر مکعب بر تن) و ۳۱۴/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۲/۹۲ متر مکعب بر تن) خواهد بود.



شکل ۸- ردپای آب سبز گندم پاییزه تحت شرایط اقلیمی دوره پایه و میانگین مدل‌های گردش عمومی جو GCM در سناریو های ٤/٥ و ٨/٥، در ٤ بازه زمانی دوره آتی در صورتی که تاریخ کشت ۳۰ آبان ماه در نظر گرفته شود.

Figure 8- Green water footprint of autumn wheat under the climatic conditions of the base period and the average of GCM general circulation models in scenarios 4.5 and 8.5, in the 4 time frames of the future period if the sowing date is considered to be 21 November.



شکل ۹. تغییرات متوسط ردپای آب سبز گندم پاییزه دشت قزوین در ٤ بازه زمانی آتی و تحت شرایط اقلیمی سناریوهای ٤/٥ و ۸/۵ پایگاه اطلاعاتی DKRZ و مدل LARS-WG، نسبت به شرایط اقلیمی پایه؛ در صورتی که تاریخ کشت محصول ۳۰ آبان ماه در نظر گرفته شود.

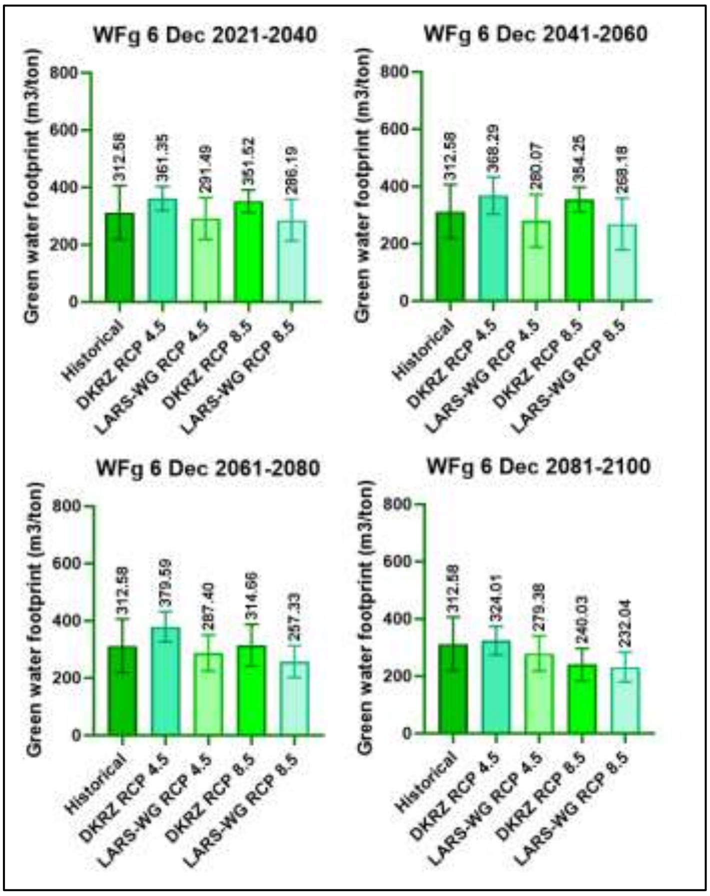
Figure 9- The average changes in the green water footprint of Qazvin plain autumn wheat in the next 4 time periods and under the climatic conditions of scenarios 4.5 and 8.5 of the DKRZ database and the LARS-WG model, compared to the basic climatic conditions; If the date of crop cultivation is considered to be 21 November.

لذا ۳۸/۹ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۶/۶۳ متر مکعب بر تن)، ۴۱/۷ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۸/۴۵ متر مکعب بر تن) و ۲/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۳/۳۵ متر مکعب بر تن) نسبت به دوره پایه افزایش ردپای آب سبز پیش‌بینی می‌شود. در دوره ۲۰۸۱–۲۱۰۰ مقدار ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه کاهش خواهد یافت که مقدار آن برابر ۲۴۰ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۶/۸۹ متر مکعب بر تن) خواهد بود، لذا ۷۲/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۵/۳۴ متر مکعب بر تن) نسبت به دوره پایه کاهش ردپای آب سبز گزارش می‌شود. بیشترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۰۶۱–۲۰۸۰ اتفاق می‌افتد.

در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۴/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۲۱–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۶۰، ۲۰۶۱–۲۰۸۰ و ۲۰۸۱–۲۱۰۰) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۲۹۱/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۲/۸۴ متر مکعب بر تن)، ۲۸۰/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۱/۸۲ متر مکعب بر تن)، ۲۸۷/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۲/۶۴ متر مکعب بر تن) و ۲۷۹/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۶۱/۳۱ متر مکعب بر تن) خواهد بود و مقدار این متغیر در دوره‌های آتی به ترتیب، ۲۱/۱ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۳/۳۱ متر مکعب بر تن)، ۳۲/۵ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۲/۸ متر مکعب بر تن)، ۲۵/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۸/۲۱ متر مکعب بر تن) و ۳۳/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۷/۵۵ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز در دوره پایه کاهش خواهد داشت.

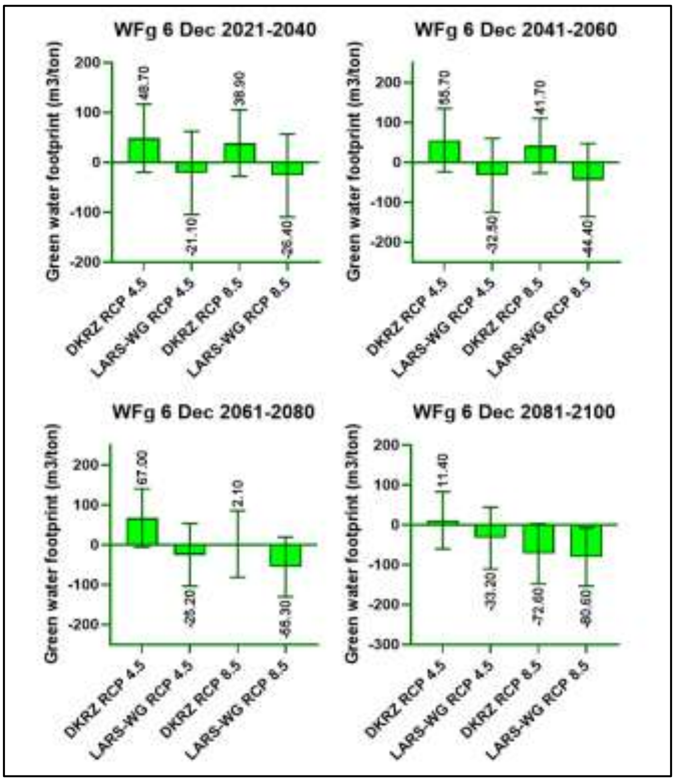
در شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵، در هر ۴ دوره آتی (۲۰۲۱–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۶۰، ۲۰۶۱–۲۰۸۰ و ۲۰۸۱–۲۱۰۰) مقادیر ردپای آب سبز نسبت به دوره پایه کاهش می یابد. مقدار ردپای آب سبز به‌ترتیب دوره‌های ذکر شده برابر ۲۸۶/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۲/۵۸ متر مکعب بر تن)، ۲۶۸/۲ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۹/۸۸ متر مکعب بر تن)، ۲۵۷/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۵/۹۵ متر مکعب بر تن) و ۲۳۲ متر

مکعب بر تن (با انحراف معیار ۵۲/۳ متر مکعب بر تن) خواهد بود و مقدار این متغیر در دوره‌های آتی به‌ترتیب، ۲۶/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۸۳/۱۸ متر مکعب بر تن)، ۴۴/۴ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۹۱/۸۳ متر مکعب بر تن)، ۵۵/۳ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۴/۸۷ متر مکعب بر تن) و ۸۰/۶ متر مکعب بر تن (با انحراف معیار ۷۳/۰۴ متر مکعب بر تن) نسبت به ردپای آب سبز در دوره پایه کاهش می‌یابد. کمترین ردپای آب سبز در دوره‌های آتی، تحت شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG تحت سناریو ۸/۵ و در دوره ۲۰۸۱–۲۱۰۰ اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰- ردپای آب سبز گندم پاییزه تحت شرایط اقلیمی دوره پایه و میانگین مدل‌های گردش عمومی جو GCM در سناریو های ٤/٥ و ٨/٥، در ٤ بازه زمانی دوره آتی در صورتی که تاریخ کشت ۱۵ آذر ماه در نظر گرفته شود.

Figure 10- The green water footprint of autumn wheat under the climatic conditions of the base period and the average of GCM atmospheric general circulation models in scenarios 4.5 and 8.5, in the 4 time frames of the future period if the sowing date is considered to be 6 December.



شکل ۱۱- تغییرات متوسط ردپای آب سبز گندم پاییزه دشت قزوین در ٤ بازه زمانی آتی و تحت شرایط اقلیمی سناریوهای ٤/٥ و ٨/٥ پایگاه اطلاعاتی DKRZ و مدل LARS-WG، نسبت به شرایط اقلیمی پایه؛ در صورتی که تاریخ کشت محصول ۱۵ آذر ماه در نظر گرفته شود.

Figure 11- The average changes in the green water footprint of Qazvin plain autumn wheat in the next 4 time periods and under the climatic conditions of the 4.5 and 8.5 scenarios of the DKRZ database and the LARS-WG model, compared to the basic climatic conditions; If the planting date of the crop is considered to be 6 December.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این بررسی نشان داد مطابق با شرایط اقلیمی مدل LARS-WG و پایگاه اطلاعاتی DKRZ تحت سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵، در هر ۴ دوره آتی میانگین ردپای آب سبز نسبت به مقدار آن در دوره پایه کاهش خواهد داشت. بیشترین مقدار ردپای آب سبز در تمام این دوره‌ها و مدل‌ها برای دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ تحت شرایط اقلیمی پایگاه اطلاعاتی DKRZ در سناریو ۴/۵ در صورتی‌که تاریخ کشت ۱۵ مهرماه انجام شود، تخمین زده می‌شود که مقدار مصرف آب در آن برابر ۴۲۷۲ متر مکعب بر تن با انحراف معیار ۵۰۱۸ متر مکعب بر تن پیش‌بینی می‌شود. کم‌ترین ردپای آب سبز نیز برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۱ تحت شرایط اقلیمی حاصل از مدل LARS-WG در سناریو ۸/۵ در صورتی‌که تاریخ کشت ۱۵ آذر ماه انجام شود، گزارش می‌شود که مقدار آن برابر ۲۳۲ تن بر هکتار با انحراف معیار ۵۲/۳ تن بر هکتار است. با بررسی ردپای آب سبز تاریخ‌های مختلف، مناسب‌ترین تاریخ کشت به منظور کاهش ردپای آب سبز در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ تاریخ ۱۵ آذر (۶ دسامبر)، تاریخ ۱۵ آذر (۶ دسامبر)، ۱ آبان (۲۳ اکتبر) و ۱ آبان (۲۳ اکتبر) می‌باشند. بنابراین کاشت زودتر گندم در منطقه می‌تواند به بهبود ردپای آب سبز گندم کمک نماید.

References

1. Ababaei, B., & Ramezani Etedali, H. (2014). Estimation of water footprint components of Iran's wheat production: Comparison of global and national scale estimates. *Environmental Processes*. https://doi.org/10.1007/s40710-014-0017-7
2. Ababaei, B., & Ramezani Etedali, H. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. Agricultural Water Management. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016
3. Ajamzadeh, A., & Mollaeinia, M.R. (2016). Assessment of impact of climate changhe on Firoozabad river runoff with downscaling of atmospheric circulation models output by SDSM and LARS-WG softwares. *Journal Iran-Water Resources Research, 109-95*(1), 12. (In Persian with English abstract)

4. Aligholinia, T., Sheibany, H., Mohamadi, O., & Hesam, M. (2019). Comparison and evaluation of blue, green and gray water footprint of wheat in different climates of Iran. *Iran-Water Resources Research, 15*(3), 234-245. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.17352347.1398.15.3.18.9
5. Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A .(2013). Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management, 116*, 50-61. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.009
6. Ene, A.S., Teodosiu, C., Robu, B., & Volf, I .(2013). Water footprint assessment in the winemaking industry: A case study of office paper. *Cleaner Production, 24*, 30–35. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.051
7. Govere, S., Nyamangara, J., & Nyakatawa, E.Z. (2020). Climate change signals in the historical water footprint of wheat production in Zimbabwe. *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140473
8. Ghorbani, Kh., Aligholinia, T.H., Rezaie, H., & Ghorbani Nasrabad, G. (2020). Evaluation and simulation of agricultural crops water footprint in different climates of Iran considering climate change scenarios. *Iran-Water Resources Research, 16*(3), 80-61 .(In Persian with English abstract)
9. Golabi, M.R., Radmanesh, F., Akhoond-Ali, A.M., & Niksokhan, M.N. (2019). Choosing a suitable area for wheat production through the concept of water footprint and social decision-making methods (case study: Esfahan province). *Iranian Journal ECO Haydrology.* (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/IJE.2019.284889.1156.
10. Hajjarpour, A., Yousefi, M., & Kamkar, B. (2014). Precision test of simulators LARS-WG, weather Man and CLIMGE Ninthree different climatessimulated (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geography Development, 35*(59), 201–16. (In Persian with English abstract)
11. Hashemi, M.Z., Asaad, Y.SH., & Bruce, W.M. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a Watershed. *Journal Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 25*(4), 475–84.
12. Hoekstra, A.Y., & Chapagain, A.K .(2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management, 21*, 35–48. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1_3
13. Kashyap, D., & Agarwal, T. (2020). Temporal trends of climatic variables and water footprint of rice and wheat production in Punjab, India from 1986 to 2017. *Journal of Water and Climate Change*. https://doi.org/10.2166/wcc.2020.093
14. Kyani, A. (2017). "*Using saline water for wheat irrigation*. Publication of Agricultural Engineering and Technical Research Institute - Office of the National Television Network of Agriculture and Knowledge Management, first edition. (In Persian)
15. Morillo, J.G., Díaz, J.A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2015). Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production, 87*, 594-602.
16. Muratoglu, A. (2020). Assessment of wheat’s water footprint and virtual water trade: a case study for Turkey. *Ecological Processes*. https://doi.org/10.1186/s13717-020-0217-1
17. Nana, E., Corbari, C., & Bocchiola, D. (2014). A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural Systems, 127*, 139-149. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.03.006
18. Obuobie, E., Mwangi Gachanja, P., & Cristina Dörr, A. (2005). The role of green water in food trade. Bonn: Zentrum Für Entwicklungsforschung (ZEF)(Term Paper for the Interdisciplinary Course, International Doctoral Studies)
19. Parlange, M.B., & W Katz, R. (2000). An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables. *Journal of Applied Meteorology, 39*(5), 610–22. https://doi.org/10.1175/1520-0450-39.5.610
20. Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*. https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90053-4
21. Sadrabadi Haghighi, R., & Sakhavati, Sh. (2018). Studying the effect of foliar application of zinc, iron and manganese elements on the yield and yield components of Pishgam bread wheat. New findings of agriculture.
22. Semenov, M.A. (2008). Simulation of extreme weather events by a Stochastic weather Generator. *Climate Research, 35*(3), 203–12. https://doi.org/10.3354/cr00731
23. Semonov, M.A., & Stratonovith, P. (2010). Use of multi- model ensembles from global models for assessment of climate change impacts. *Journal Climate Research, 41*, 1-14.
24. Wang, Ch., Zhao, J., & Tian, B. (2021). *Assessment of water footprint for crop production: a case study in North China.* IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. https://doi.org/10.1088/1755-1315/831/1/012047